戦-６　ずい道建設における機械掘削時の粉じん対策技術の開発

研究予算：運営費交付金（道路整備勘定）
研究期間：平17～平20
担当チーム：技術推進本部（施工技術）
研究担当者：大下武志、宇田川義夫、井谷雅司、徐永強

【要旨】
建設工事環境改善実験施設（延長100m、断面積80m²）を利用し、機械掘削時の粉じん低減技術の開発を目的とした実物大トンネル模擬実験を行い、得られた結果から、粉じん濃度とデジタル粉じん計の質量濃度換算係数K値との関係について分析した。また、各種の粉じん低減技術を適用し、それらの粉じん低減効果の確認を行った。実験の結果、①粉じん濃度が大きいほどK値が大きいこと、②K値が粒径分布の影響を受け、大きな粒径の粉じんが増えるのにしたがってK値が大きくなること、③伸縮風管による粉じん拡散防止対策が粉じん低減に非常に効果を発揮することがわかった。
キーワード：トンネル、機械掘削、粉じん、質量濃度換算係数K値、伸縮風管

1. はじめに

トンネルの機械掘削時には多量の粉じんが発生する場合がある。これらの鉱物性粉じんは、じん肺症等の粉じん障害を引き起こす危険性を高める。平成12年12月には労働省（現厚生労働省）より「ずい道等建設工事における粉じん対策に関するガイドライン」（以下「ガイドライン」とする）[1)]が策定され、発生粉じん濃度3mg/m³以下の目標レベルが示されている。また、平成20年3月1日には「粉じん障害防止規則等の一部を改正する省令」[2)]が施行され、事業者は半月以内ごとに１回のトンネル内の粉じん濃度測定が義務化されることとなった。

この粉じん濃度測定は、簡便に測定が可能である光散乱方式デジタル粉じん計が使用されることが多いが、測定値から粉じん濃度を算定するためには、質量濃度換算係数（以下「K値」とする）が必要となる。K値を求めるためには、直接粉じんを吸引する方式であるローボリウムエアーサンプラーとデジタル粉じん計による併行測定を実施して算定するのが基本であるが、実際にはガイドライン[1)]で示されているK値を採用してデジタル粉じん計のみで粉じん濃度を求めるのが一般的になっているように思われる。

平成19年度の技術開発は、土木研究所構内にある建設工事環境改善実験施設（延長100m、断面積80m²）を利用し、機械掘削時の粉じん低減技術の開発を目的とした実物大トンネル模擬実験を行った。得られた実験結果から、発生粉じん特性とデジタル粉じん計のK値との関連性について分析を行った。また、各種の粉じん低減技術を適用し、それらの粉じん低減効果の確認を行った。

実施体制として、「山岳トンネルにおける機械掘削時の粉じん低減に関する研究」について、財団法人先端建設技術センターおよび民間会社８社と共同研究で進めた。

以下に、実験で得られた成果について述べる。

２．模擬岩盤を用いた機械掘削実験

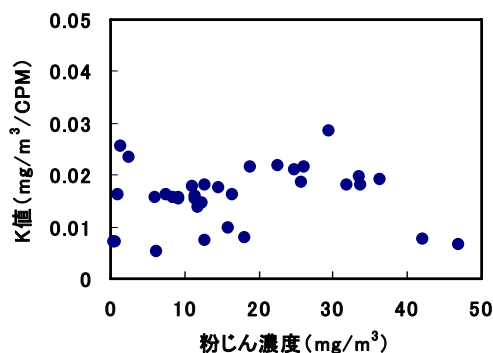
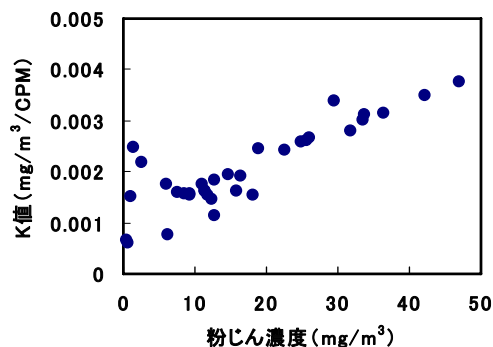
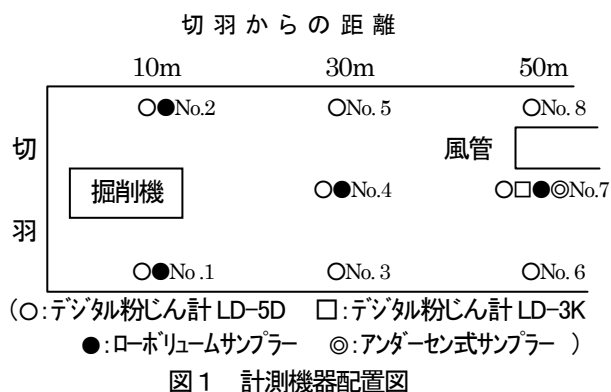
機械掘削の試験体は、岩盤を模擬したコンクリート（一軸圧縮強度 30MPa）を使用した。自由断面掘削機はロードヘッダ RH-8J（カヤバシステムマシナリー㈱製）を使用した。実験は、送風量、散水量、粉じん低減対策（伸縮風管・エアカーテン・ミストなど）の諸条件を変えて模擬岩盤を切削し、発生した粉じんを粉じん測定機器により計測した（写真１）。粉じん測定機器の配置は図１に示すように、デジタル粉じん計LD-5D（以下「LD-5D」とする）を８台、デジタル粉じん計LD-3K（以下「LD-3K」とする）を１台、ローボリウムエアーサンプラー（LV-40BR）4台、アンダーセンサンプラー（AN-200）1台により行なった（写真２）。

写真１　模擬岩盤コンクリート掘削状況

図１　計測機器配置図

図２　粉じん濃度とＫ値の関係（LD-3K）

写真２　50m 地点計測状況

図３　粉じん濃度とＫ値の関係（LD-5D）

３．実験結果と考察

３．１　粉じん濃度とＫ値との関連性

ガイドライン[1)]によれば、粉じん濃度は次式で算定される。

粉じん濃度(mg/m³)＝質量濃度換算係数(K値)　×光散乱方式デジタル粉じん計の相対濃度(CPM)　　　［1］

ガイドライン[1)]では、LD-3KのK値は0.003という数値が示されている。また、高濃度環境（100mg/m³以下）対応のLD-5DのK値は取扱説明書[3)]で 0.01（1CPM＝0.01 mg/m³）という数値が示されている。実験では、［1］式においてローボリウムエアーサンプラーから得られた粉じん濃度とデジタル粉じん計の相対濃度からK値を算定した。

粉じん濃度とLD-3KによるK値との関係を図２に、粉じん濃度とLD-5DによるK値との関係を図３に示した。図２からLD-3Kでは粉じん濃度 10 mg/m³以下でK値はばらついており、粉じん濃度が増加するのにしたがいK値が大きくなる傾向にある。また図３から、LD-5Dでは全体にK値が大きくばらついている。

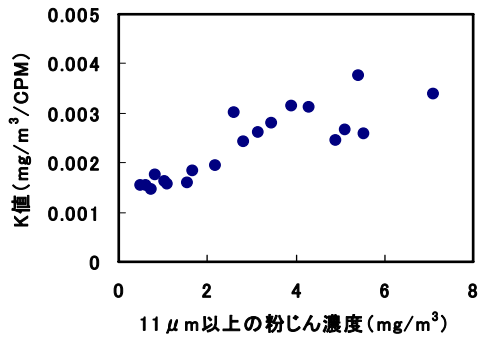
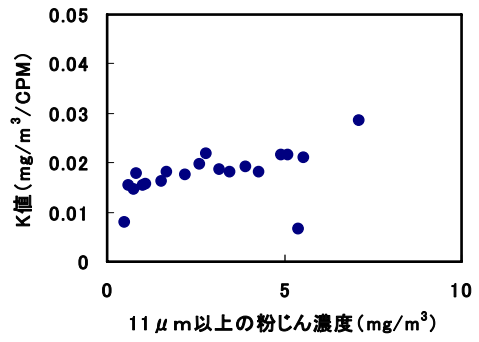
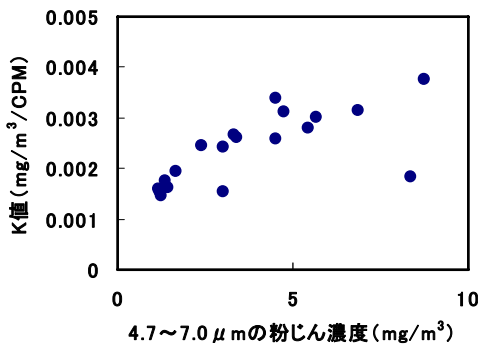
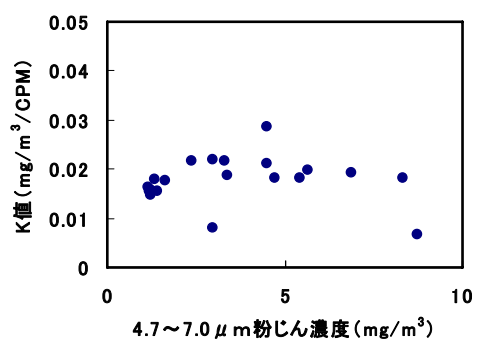
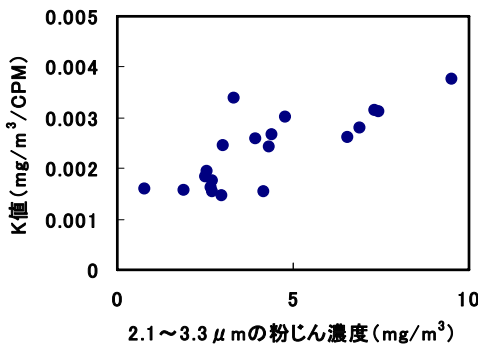
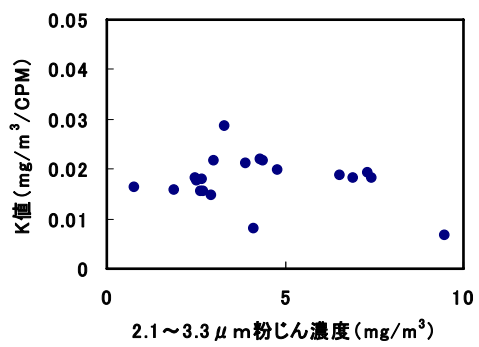
実験結果では、LD-3Kは粉じん濃度 10mg/m³以下の環境での測定では、K値＝0.001～0.003（mg/m³/CPM）を示している（図２）。したがって現行のガイドラインが示すLD-3K のK値＝0.003（mg/m³/CPM）という数値は安全側の評価になっているが、場合によってはK値＝0.001（mg/m³/CPM）程度のケースもあり、粉じん濃度が実際よりも過大に評価されている可能性がある。

３．２　粒度ごとの粉じん濃度とＫ値との関連性

アンダーセンサンプラーで得られたそれぞれの粒径範囲の粉じん濃度を次式によって求めた。

ｱﾝﾀﾞｰｾﾝｻﾝﾌﾟﾗｰでのそれぞれの粒径範囲の粉じん濃度(mg/m³)＝粉じん濃度(mg/m³)×それぞれの粒径の重量百分率(％)÷100(％)　　　［2］

図４・図５に、アンダーセンサンプラーで得られた 11 μm以上、4.7～7μm、2.1～3.3μm、ならびに 0.65～1.1μmの粒径範囲の粉じん濃度とＫ値との関係を示す。これより、粒径が大きい範囲では、粉じん濃度が増加するのにしたがってＫ値が大きくなっていることが分かる。

デジタル粉じん計の原理は、粉じんに半導体レーザー光を照射したとき、粉じんの物理的性質が同一条件であれば粉じんによる散乱光の量が質量濃度に比例することを利用して、空気中に浮遊している質量濃度を散乱光の強弱として測定することである。また照射光に対して粉じんの粒径が大きくなるほど前方散乱量が大きくなる傾向がある。

a)11μm以上の粉じん濃度とＫ値の関係

b)4.7～7μm以上の粉じん濃度とＫ値の関係

c)2.1～3.3μm以上の粉じん濃度とＫ値の関係

d)0.65～1.1μm以上の粉じん濃度とＫ値の関係

図４　粉じん濃度とＫ値の関係（LD-3K）

a)11μm以上の粉じん濃度とＫ値の関係

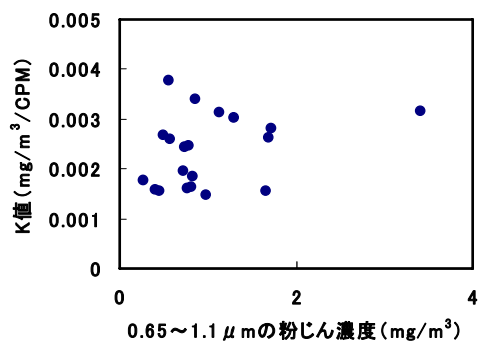
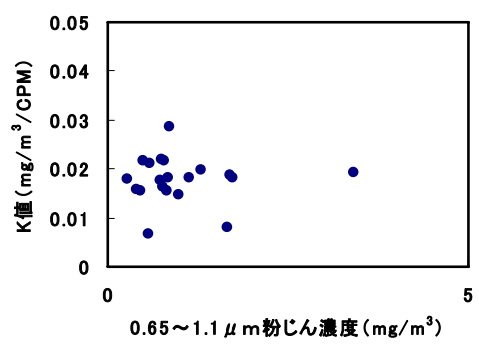
b)4.7～7μm以上の粉じん濃度とＫ値の関係

c)2.1～3.3μm以上の粉じん濃度とＫ値の関係

b)0.65～1.1μm以上の粉じん濃度とＫ値の関係

図５　粉じん濃度とＫ値の関係（LD-5D）

このような測定原理のため、粒径の大きな粉じんが増えるのにしたがって、前方散乱光の量が増加し受光側(照射光に対して135度）の散乱量（CPM）が相対的に低くなり、［1］式で求められるＫ値が大きくなるものと考えられる。このことが、大きい粒径範囲の粉じんが多くなるほどK値が増大している理由と考えられる。

３．３　粉じん粒度分布特性とＫ値との関連性

粉じんの粒度分布特性とＫ値との関連性を検討するため、粉じんの粒度分布は統計的なフラクタル分布を示す（粒度の細かい部分を拡大したときに粒度の粗い部分と類似の分布形態を示している）ものと仮定し、フラクタル次元（Mandelbrot[4]、高安[5]、Feder[6]、石村[7]など）によって粒度分布の定量的評価を試みた。すなわち、粉じんの粒度分布のフラクタル次元は、式［3］から求めることとする。

$$D = -\frac{\Delta \log N(\eta)}{\Delta \log \eta} \qquad [3]$$

したがって、両対数紙上に（η、N（η））をプロットしたときに、その回帰直線の勾配の逆符号がフラクタル次元Dとなる。

この場合、ηは粒径（μm）を表し、N（η）は粒径η（μm）以上の粉じんの重量（g）を表す。

ここで、フラクタル次元を求める粒径の範囲を、

$$\eta_{\min} \le \eta \le \eta_{\max} \qquad [4]$$

とすると、式［3］から

$$D = -\frac{\log N(\eta_{\max}) - \log N(\eta_{\min})}{\log \eta_{\max} - \log \eta_{\min}} = \frac{[-\log N(\eta_{\max})] - [-\log(\eta_{\min})]}{\log \eta_{\max} - \log \eta_{\min}} \qquad [5]$$

ここで、

$$\frac{\eta_{\max}}{\eta_{\min}} = \xi (= const.) \qquad [6]$$

とおくと、式［5］から

$$D = \frac{\log \dfrac{N(\eta_{\min})}{N(\eta_{\max})}}{\log \xi} \qquad [7]$$

が導かれる。

式［7］から、粉じんの細粒分が粗粒分より相対的に多いほど、フラクタル次元Dは大きくなる。

すなわち、フラクタル次元Dが大きいほど、粉じん中の細粒分の割合が多くなり、人体に悪影響を及ぼすとされる粒径5μm以下の粉じんを多く含有することになる。

本研究では、トンネル切羽から50mの距離に設置したアンダーセンサンプラーの測定値により、式［3］（logηと－log$N$（η）の回帰直線の勾配）から、粉じんのフラクタル次元を算出した。

アンダーセンサンプラーは、粒径ηが、11μm≦η、7μm≦η＜11μm、4.7μm≦η＜7μm、3.3μm≦η＜4.7μm、2.1μm≦η＜3.3μm、1.1μm≦η＜2.1μm、0.65μm≦η＜1.1μm、0.43μm≦η＜0.65μm、0.43μm≧η、の各粒径の範囲で粉じんがサンプリングされる。

フラクタル次元の算定にあたっては、粉じんの計量誤差による影響を避けるため、サンプリングされた粉じん量が少ない、2.1μm＞ηのデータは除外して、2.1μm≦ηのデータを用いてフラクタル次元を算出した。

図６に、フラクタル次元解析結果の一例を示す。この場合、フラクタル次元は一次回帰式の勾配で表され、フラクタル次元はD=1.508となる。

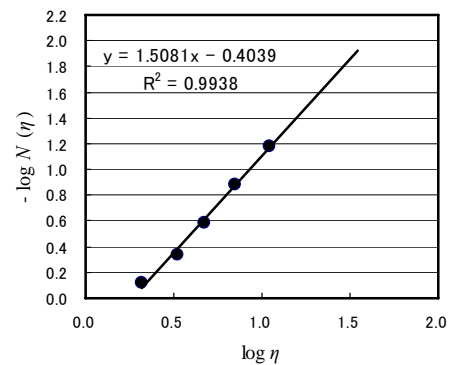



図６　フラクタル次元解析

図７に、粉じん粒度分布のフラクタル次元とLD-3KのK値との関係を示す。これより、LD-3Kでは粉じん粒度分布のフラクタル次元とK値との関係は明瞭ではない。これは、LD-3Kの測定推奨範囲が粉じん濃度10mg/m³以下であるのに対して、ほとんどの実験ケースが粉じん濃度10mg/m³以上であり、3.1項で考察したように、粉じん濃度が大きくなり粒径の大きな粉じんが増えるのにしたがってCPM値の誤差が大きくなるためであり、K値が粉じんの粒度分布特性に依存していないことを示している。

また図８に、粉じん粒度分布のフラクタル次元とLD-5DのK値との関係を示す。これより、LD-5Dでは粉じん粒度分布のフラクタル次元が大きくなるほど、すなわち細かい粒径が相対的に多くなるほどK値が減少している。このことは、K値が粉じんの粒度分布特性に依存していることを示している。

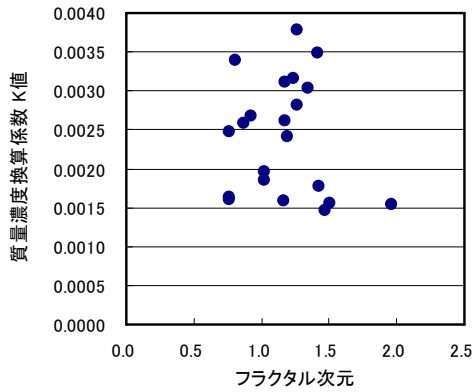



図7　粉じん粒度分布のフラクタル次元とK値の関係(LD－3K)

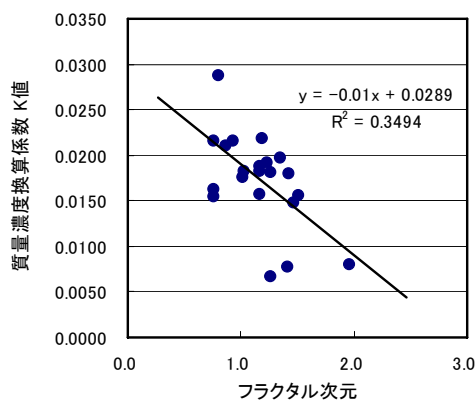



図8　粉じん粒度分布のフラクタル次元とK値の関係(LD－5D)

４．粉じん低減技術の適用

４．１　基礎実験

基礎実験として、対策技術を適用しない実験ケースを行った。送風のみで散水なしの場合、50m地点での粉じん濃度は 18.7～33.5mg/m³を示した。また、送風ありで散水ありの場合、50m地点での粉じん濃度は 7.5～12.7mg/m³を示した。

４．２　泡＋ミスト

泡とミストによる粉じん抑制技術を適用した（図９、写真３）。
50m地点での粉じん濃度は8.4～36.3mg/m³であり、基礎実験結果と比較すると、ほとんど低減効果が得られなかった。

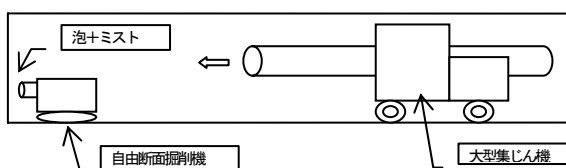



図９　泡とミストによる粉じん低減技術

写真３　泡とミストによる粉じん低減技術

４．３　伸縮風管

基礎実験結果と比較すると、50m地点での粉じん濃度は 0～3.3mg/m³であり、非常に低減効果を発揮した（図１０、写真４)。

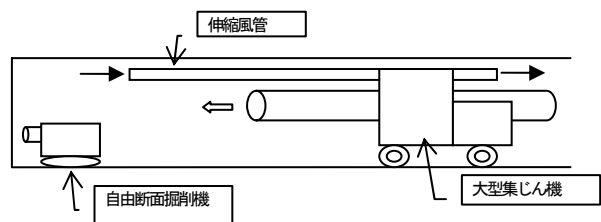



図１０　伸縮風管による粉じん低減技術

写真４　伸縮風管による粉じん低減技術

４．４　伸縮風管＋エアカーテン

基礎実験結果と比較すると、50m地点での粉じん濃度が 0～2.4mg/m³であり、非常に低減効果を発揮した（図１１、写真５）

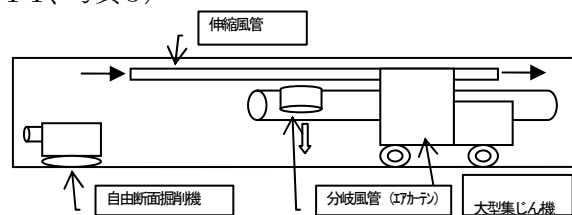



図１１　伸縮風管＋エアカーテンによる粉じん低減技術

写真5　伸縮風管＋エアカーテンによる粉じん低減技術

４．５　伸縮風管＋ミスト

基礎実験結果と比較すると、50m地点での粉じん濃度が0.5～16.3mg/m³と低減効果を発揮した。ただし、送風を行ったケースでは 6.1～46.9 mg/m³と粉じん濃度が増大した。（図１２、写真６）

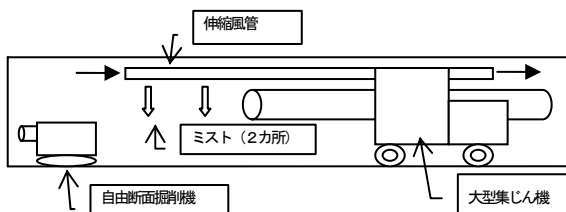



図１２　伸縮風管とミストによる粉じん低減技術

写真６　伸縮風管とミストによる粉じん低減技術

５．まとめ

平成 19 年度の技術開発により明らかとなったことを以下にまとめる。

① デジタル粉じん計LD-3Kでは粉じん濃度 10 mg/m³以下でK値はばらついており、粉じん濃度が増加するのにしたがいK値が大きくなる傾向にある。また高濃度環境対応型のデジタル粉じん計LD-5Dでは全体にＫ値が大きくばらついている。

② デジタル粉じん計LD-3Kは、粉じん濃度10mg/m³以下の環境での測定では、Ｋ値＝0.001～0.003（mg/m³/CPM）を示しており、ガイドライン[1)]が示すデジタル粉じん計LD-3K のK値＝0.003（mg/m³/CPM）という数値は安全側の評価になっている。しかしながら、場合によってはK値＝0.001（mg/m³/CPM）程度のケースもあり、粉じん濃度が実際よりも過大に評価されている可能性がある。

③ デジタル粉じん計 LD-3K およびデジタル粉じん計 LD-5D では、大きい粒径範囲の粉じんが多くなるほどＫ値が増大する。

④ デジタル粉じん計LD-3K ではＫ値が粉じんの粒度分布特性に依存していないのに対して、デジタル粉じん計LD-5D ではＫ値は粉じんの粒度分布特性に依存しており、細かい粒径が相対的に多くなるほどＫ値が減少する傾向が見られた。

⑤ 各種の粉じん低減技術を適用し、それらの粉じん低減効果の確認を行ったところ、伸縮風管を使用した対策技術が非常に効果を発揮した。これは、なるべく粉じん発生源の近くで、粉じんが拡散する前に集じんを行うことが非常に有効であることを示している。

謝辞

最後に、共同研究メンバーである、(財)先端建設技術センター、鹿島建設㈱、カヤバシステムマシナリー㈱、清水建設㈱、菅機械工業㈱、西松建設㈱、日鉄鉱業㈱、㈱フジタ、㈱三井三池製作所の関係各位には謝意を表します。

参考文献

1) 労働省(2000):ずい道等建設工事における粉じん対策に関するガイドライン.
2) 厚生労働省(2008):粉じん障害防止規則等の一部を改正する省令.
3) 柴田科学㈱：デジタル粉じん計LD-5D型取扱説明書.
4) Mandelbrot, B. B. (1982)：The Fractal Geometry of Nature、W. H. Freeman and Company、New York、468p.
5) 高安秀樹 (1986)：フラクタル、朝倉書店、186p.
6) Feder, J. (1988):Fractals, Plenum Press、New York、283p.
7) 石村貞夫、石村園子 (1990)：フラクタル数学、東京図書、159p.

DEVELOPMENT OF DUST CONTROL TECHNOLOGY IN THE TUNNEL CONSTRUCTION WITH EXCAVATION MACHINES

Abstract : A study was conducted using a full-scaled tunnel simulation at our Construction Environment Laboratory (100 meter-long, cross-sectional area 80 square meters). From the results of the study, correlation between dust concentration and mass conversion concentration coefficient K-values of digital dust meter was analyzed. Moreover, various kinds of dust reduction technology was applied, and those dust reduction effects were checked. As a result, it was found that 1) the more dust concentration being large, the more K-values being large, 2) K-values are influenced by grain size distribution, and K-values become large according to the particulates of big particle diameter increasing in number, 3) The measure against particulate nonproliferation with the elastic ventilation ducting demonstrates an effect very much to particulate reduction.
Key words : Tunnel, Machine digging, Dust, Mass concentration conversion coefficient K-value, Elastic ventilation ducting